浑善达克沙地西部新月形沙丘和抛物线沙丘共存区的地貌特征

任孝宗， 王嵩松， 王亚梅， 罗进洪， 马永桃

（太原师范学院地理科学学院，山西 晋中 030619）

摘 要： 新月形沙丘和抛物线沙丘可以相互转化和共存，对共存区地貌特征的研究有助于对其形成原因的理解和为防沙治沙提供科学依据。本文基于Esri历史影像服务，对浑善达克沙地西部新月形沙丘和抛物线沙丘共存区3个时期（2008年1月15日、2011年6月4日和2016年9月20日）的沙丘形态参数进行了提取，并计算了沙丘的移动方向和移动速度。结果表明：典型新月形沙丘集中分布于沙地西部的15个与干湖盆有关的区域，雏形新月形沙丘和雏形抛物线沙丘则依次分布在干湖盆外围，干湖盆的出现是浑善达克沙地典型新月形沙丘发育的关键因素，对湖泊干涸引起的沙漠化应引起足够重视。对共存区最典型的5区分析发现，典型新月形沙丘和雏形新月形沙丘在涉及到两翼的形态参数分布模式上与雏形抛物线沙丘有明显差异。进一步对沙丘形态参数间的相关性分析发现，从新月形沙丘向抛物线沙丘的转变过程中，迎风坡长、背风坡长和底面积的变化具有继承性，两翼在该过程中变化最大。此外，3类沙丘的移动方向在数值上差异不大并与合成输沙势方向（RDD）的变化一致，但三者的移动速度差异明显，且影响不同类型沙丘移动速度的因素也不相同。其中，植被对植被覆盖状况相对良好的雏形抛物线沙丘影响最明显，表现为其移动速度与同时期的沙地NDVI变化趋势一致；而风速对植被覆盖较低的典型新月形沙丘和雏形新月形沙丘影响更显著，表现为其移动速度与同时期输沙势（DP）和合成输沙势（RDP）的变化趋势一致。此外，地形、沙源和人类活动对共存区沙丘的形态和移动均有影响。

关键词： 新月形沙丘；抛物线沙丘；共存；形态和移动；浑善达克沙地

新月形沙丘和抛物线沙丘是两种常见的沙丘类型，在气候变化或人为因素的影响下，两者可以相互转化并出现过渡形态的沙丘，表现为同一区域出现包括典型新月形沙丘、雏形新月形沙丘和雏形抛物线沙丘3类沙丘共存的独特景观[1]。植被、气候、风况、人为因素、地下水盐碱化等都能引起新月形沙丘与抛物线沙丘的转化[2-3]，但不同区域引起该现象的原因并不相同，明确特定新月形沙丘和抛物线沙丘共存区的沙丘类型、空间分布、形态特征、移动规律和具体原因对于精准防沙治沙具有重要的现实意义，是制定合理土地利用政策的重要依据[4]。

新月形沙丘和抛物线沙丘共存区3类沙丘具有沿主风向分布的特点，其中，典型新月形沙丘平面形态呈U或V形，两翼指向下方向，形成于单一风向、低沙源供给、缺乏植被的沙漠边缘，该类型沙丘属于流动性沙丘[5]，其较快的移动速度对公路、铁路等设施的破坏很大，是防沙治沙的重点对象[6-8]。抛物线沙丘一般由新月形沙丘或横向沙丘演化而来，此外，海岸沙丘、风蚀洼地等也可转变为抛物线沙丘[3,9]，其破坏性相对较小。抛物线沙丘在植被退化的情况下可转化为新月形沙丘或横向沙丘[10]。新月形沙丘和抛物线沙丘相互转化的直接原因是植被变化，植被增长率的增加可导致新月形沙丘转化为抛物线沙丘[11]。数值模拟发现，当沙丘表面侵蚀/沉积速率降低至植被生长速率的一半以下时就会发生这种转变[12]。植被变化又与气候有关，Wolfe等[13]发现，新月形沙丘转化为抛物线沙丘的活跃期对应于夏季温度和地表温度较高的时期；而相反的沙丘活化过程则对应于夏季干冷期。Zhang等[1]还发现，风力的降低有利于植被的发育，风能环境是

收稿日期： 2023-04-20； **修订日期：** 2023-10-04

基金项目： 山西省哲学社会科学规划课题（2023YY228）；太原师范学院基础教育教学改革项目

作者简介： 任孝宗（1983-），男，博士，副教授，主要研究方向为风沙地貌、干旱区环境演变和水文地球化学. E-mail: renxzmail@126.com

影响新月形沙丘向抛物线沙丘转化的重要因素。地下水水位的变化可以影响植被生长,特别是人类活动导致的地下水水位下降能引起抛物线沙丘转化为新月形沙丘或横向沙丘[14]。此外,土地退化和土壤盐碱化也能引起沙丘类型的转化[15]。

由于耗时较长、成本较高等原因,传统的、基于野外调查的方法并不十分适用于大规模的沙丘形态和移动研究,随着卫星影像技术的快速发展,对沙丘的长期监测和演变量化变为可能[16]。卫星影像技术具有大范围、长时间、可持续观测的优点,常见的卫星影像如Google Earth的高分辨率影像产品,可用于沙丘分类、形态和移动研究[17-21]。此外,除了对沙丘平面形态参数的提取,利用DEM[22]或Landsat影像的阴影效应[23],甚至可以实现对沙丘地形信息的提取。

浑善达克沙地地处我国农、牧过渡区,生态环境脆弱,其西部新月形沙丘和抛物线沙丘共存且有雏形新月形沙丘出现。本文基于Esri历史影像服务(World Imagery Wayback)提取了浑善达克沙地新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的形态参数,利用不同时期的历史影像计算沙丘的移动方向和移动速度,通过分析沙丘形态参数之间的关系以及沙丘移动的特点,对影响沙丘的类型、空间分布、形态特征和移动规律的因素进行了探讨。

1　研究区概况

浑善达克沙地位于内蒙古高原东部,是我国北方沙漠/黄土边界带和农牧交错区,东西跨度约420 km,南北跨度约125 km。沙地北部为平坦的锡林郭勒草原,西部一直延伸到二连盆地中部,南部和东部均被山脉包围。其中,南部为阴山山脉东延(图1),呈山地黄土景观,东部为大兴安岭南段。地形上,沙地具有西北低东南高的特点,海拔自西北部约1000 m缓慢上升至东南部约1300 m[24]。气候上,沙地属于北温带干旱-半干旱气候区,大部分地区年均温1.75~3.23 ℃,其中,东南部受季风的影响较西北部显著,导致降水量从东南部约450 mm减少到西北部的150 mm[25]。浑善达克沙地以西北风为主,大风日数达50~70 d,对其内部固定、半固定沙丘、流动、半流动沙丘的形成有很大影响[26]。浑善达克沙地东部以固定沙丘为主,多呈沙垄、沙垄-梁窝状和灌丛状沙丘,水资源较丰富,从沙地内部发育了多条河流,湖泊水质以淡水为主[24];而研究区所在的西部地区则以半固定和流动沙丘为主[27],水资源相对东部匮乏,多为干涸、半干涸的盐碱湖,碱矿储量较高[28]。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

卫星影像获取自Esri历史影像服务(World Imagery Wayback),该数据主要来源于SPOT5、GE01、WV02和WV03等卫星,空间分辨率0.31~2.5 m,满足沙丘形态测量的要求。风况数据为NCDC(National Climatic Data Center,美国国家气候数据中心)相关气象数据产品,采样频率为3 h,包括风向和风速,其中,风向数据以正北为起点,以顺时针16方位表示,风速精度为0.1 $m\cdot s^{-1}$。

2.2　研究方法

将Esri历史影像按照时间顺序加载至ArcGIS后,采用测量工具可实现对相应时段迎风坡长度(L_U)、背风坡长度(L_D)、翼间宽长度(W)、南翼长度(L_S)、北翼长度(L_N)和底面积(S)的测量(图2a~图2c)。需要指出的是,雏形抛物线沙丘的形态较为特殊,既有指向下风向的类似新月形沙丘的翼角,也有指向上风向的类似抛物线沙丘的翼角,本文测量的雏形抛物线沙丘的翼长为两者之和,翼间宽为其新月形翼角之间的距离(图2c)。沙丘整体移动速度和方向的判定采用五点平均法[29],即利用沙丘上5个特征点的移动距离及移动方向来表征沙丘移动。5个特征点分别为迎风坡前端、沙丘顶点、背风坡底、南翼和北翼(图2d~图2f),则沙丘整体移动速度为:

$$V=(d_1+d_2+d_3+d_4+d_5)/5t \quad (1)$$

式中:d_1、d_2、d_3、d_4、d_5分别为迎风坡前端、沙丘顶点、背风坡底、南翼和北翼的移动距离;t为两期影像的时间间隔。

沙丘整体移动方向为:

$$\theta=(\theta_1+\theta_2+\theta_3+\theta_4+\theta_5)/5 \quad (2)$$

式中:θ_1、θ_2、θ_3、θ_4、θ_5分别为迎风坡前端、沙丘顶点、背风坡底、南翼和北翼的移动方向(以正北为0°,顺时针方向旋转)。

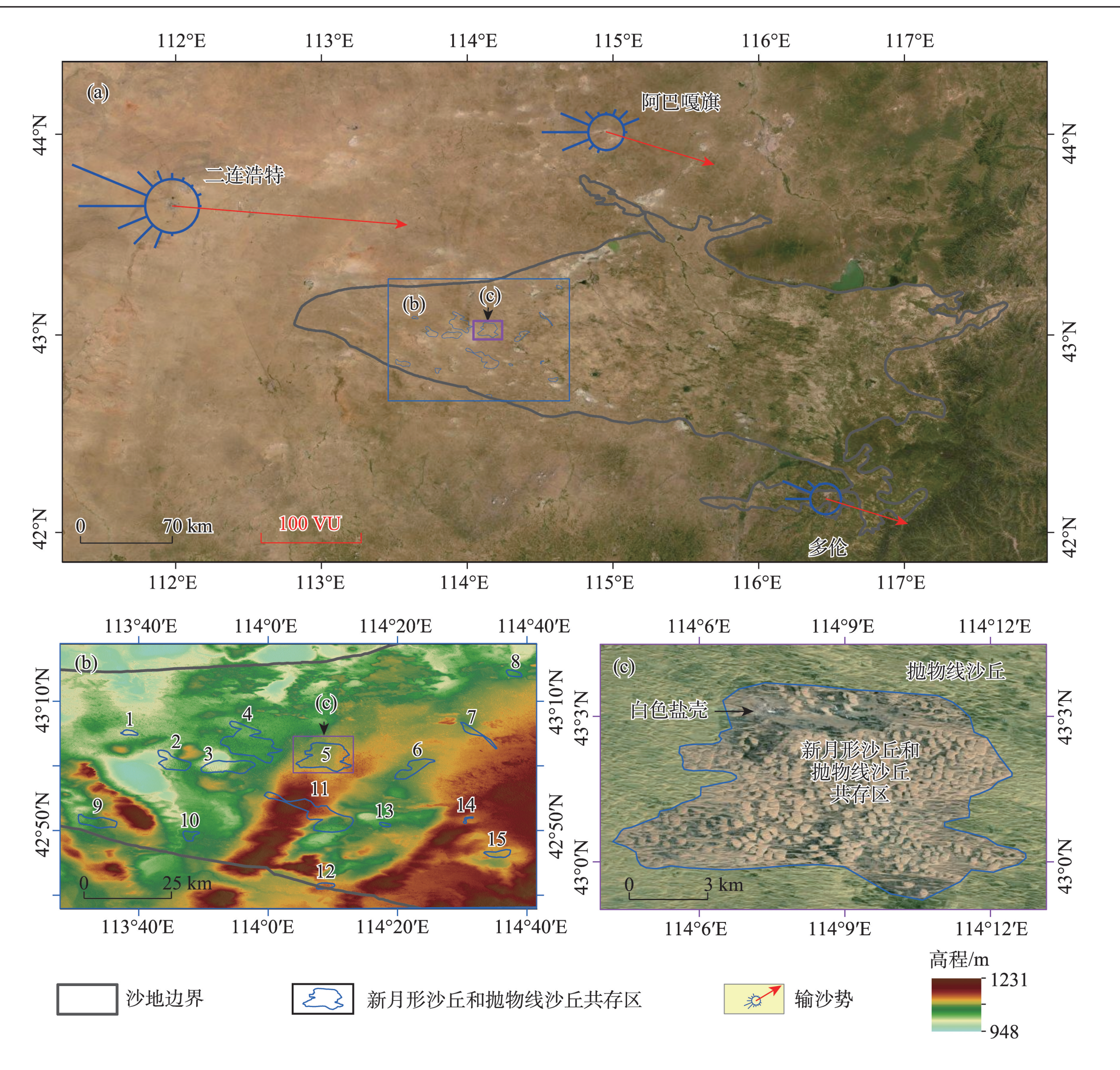


图1　研究区概况

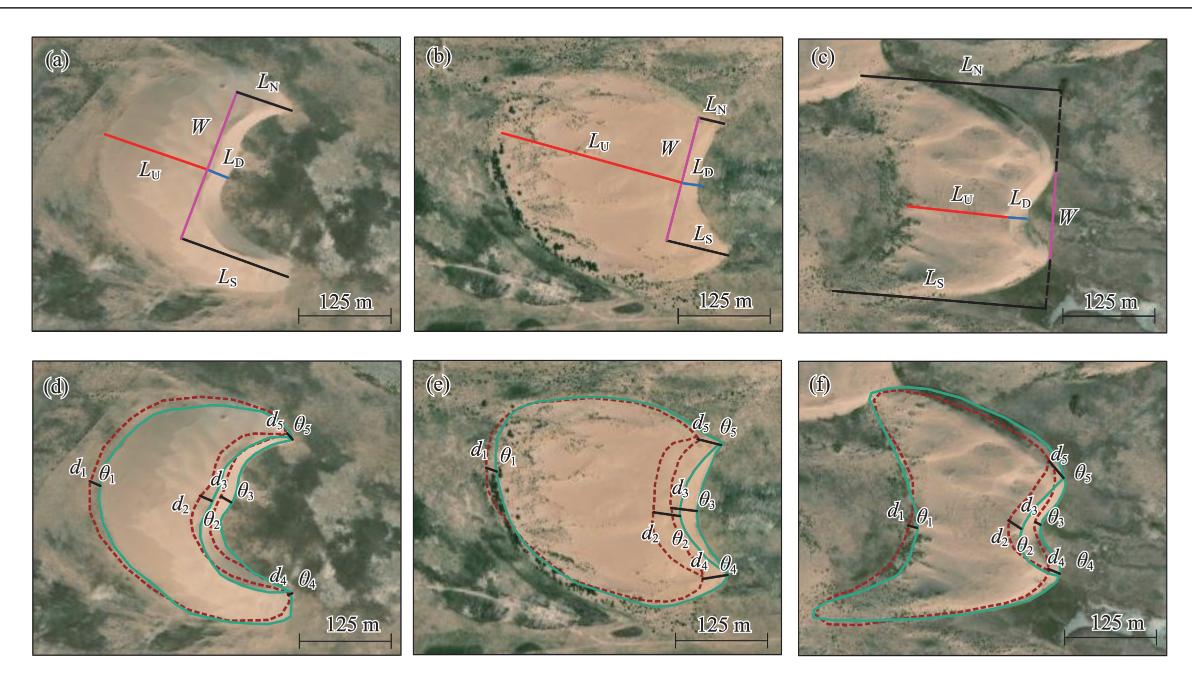
Fig. 1　Overview of the study area

3　结果与分析

3.1　新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的分布

卫星影像显示(图1a),浑善达克沙地西部呈斑点状分布着大量新月形沙丘和抛物线沙丘共存区,沙丘类型为典型新月形沙丘、雏形新月形沙丘和雏形抛物线沙丘,并主要以聚集形态分布于15个区域,其外围以东连片分布着大量抛物线沙丘,以西则分布着大量半固定蜂窝状沙丘,这种分布格局与前人的研究结果一致[30-31],表明在对应时期内各类型沙丘的总体分布格局没有发生显著变化。在各新月形沙丘和抛物线沙丘共存区内或周边均分布着干湖盆,并有白色盐壳出露,各区域之间则往往分布着抛物线沙丘。以5区(图1c)为例,其北部为几近干涸的湖床,其上出露白色盐壳,附近分布着典型新月形沙丘,干湖盆以南分布着大量雏形新月形沙丘和雏形抛物线沙丘,大量抛物线沙丘则围绕在5区周围。

浑善达克沙地新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的中轴线均近似为西北-东南走向,翼角位于其两侧(即南翼角和北翼角),各类型沙丘之间具有明显的形态差异。其中,典型新月形沙丘(简称1型沙丘)平面形态呈新月形,一般位于干湖盆核心区域,两翼较长并多不对称,指向下风向(图2a和图2d)。雏形新月形沙丘(简称2型沙丘)平面



注:(a)、(d)为新月形沙丘;(b)、(e)为雏形新月形沙丘;(c)、(f)为雏形抛物线沙丘;(a)、(b)、(c)为3类沙丘形态参数测量示意图;(d)、(e)、(f)为3类沙丘移动方向和移动速度测量示意图。

图2　新月形沙丘和抛物线沙丘共存区3类沙丘形态参数和移动速度的测量

Fig. 2　Three types of dunes in coexistence zone of barchan dunes and parabolic dunes, as well as the measurement of their morphological parameters and sand dune migration

形态较典型新月形沙丘浑圆,翼角短而粗,除具有指向下方向的南、北翼外还存在不显著的、指向上风向的翼角(图2b和图2e)。雏形抛物线沙丘(简称3型沙丘)指向上风向的翼角显著发育,同时仍然残存部分指向下方向的翼角,迎风坡相对破碎,与植被交错分布,两者的界限不十分明显(图2c和图2f)。

3.2　新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的形态特征参数

本文选取新月形沙丘和抛物线沙丘共存区最典型的5区进行沙丘形态提取(图1c),获取到该区1~3期的卫星影像,拍摄时间分别为2008年1月15日、2011年6月4日和2016年9月20日,时间跨度超过8 a,共获取各类沙丘99个,其中,典型新月形沙丘16个,雏形新月形沙丘64个,雏形抛物线沙丘19个。研究期内沙丘类型没有发生转变,但个体沙丘的形态特征参数均有变化,各期典型新月形沙丘、雏形新月形沙丘和雏形抛物线沙丘的L_U、L_D、W、L_S、L_N和S的统计值见表1。

3.3　新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的形态演化

按照1~3期的时间顺序利用箱形图(图3)对各类沙丘形态参数进行分析,结果发现,各类沙丘形态参数的中位数变化不同,其中,迎风坡长度的中位数增加、翼间宽长度的中位数减小、底面积的中位数小幅减小;背风坡长度的中位数具有先减少后增加的趋势;南、北翼角的异常值最多。对同期各类沙丘形态参数进行比较发现,迎风坡和底面积的中位数表现为:1型沙丘<2型沙丘<3型沙丘;背风坡和翼间宽的中位数表现为:1型沙丘>2型沙丘>3型沙丘。此外,3型沙丘南、北翼的中位数最大,1、2型沙丘的均较小,但2型沙丘的异常值较多。

将新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘不同时期各形态参数绘制在同一双变量图中,并用带箭头的线段将1~2期和2~3期的数值依次连接,可以直观的反映沙丘各形态参数随时间的变化(图4)。不同于箱型图(图3)是从统计学的角度反映沙丘形态参数随时间变化的整体规律,该图(图4)不但能有效指示个体沙丘形态参数随时间的变化,同时还能反映2种参数(双变量)随时间的变化。结果显示,1~3期3类沙丘的底面积-迎风坡、底面积-翼间宽表现为近似的线性分布特征,而其他沙丘形态参数之间特别是在包含南、北翼的双变量图中不存在这种线性分布特征。

表1 新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的形态特征参数

Tab. 1 Morphological parameters of dunes in coexistence zone of barchan dunes and parabolic dunes

	迎风坡 L_U/m			背风坡 L_D/m			翼间宽 W/m		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
1期1型沙丘	93.18	241.26	163.66	17.29	49.67	33.07	106.11	356.15	217.95
1期2型沙丘	78.03	293.52	180.05	8.45	49.07	28.79	72.27	320.79	189.29
1期3型沙丘	99.58	307.90	212.79	13.66	36.94	26.62	52.36	311.31	172.55
2期1型沙丘	109.76	233.90	167.72	17.91	41.22	26.18	117.38	363.22	208.39
2期2型沙丘	83.60	285.66	188.52	8.55	39.13	22.55	78.22	346.92	186.55
2期3型沙丘	105.05	339.38	223.50	7.61	30.43	19.07	48.25	248.96	150.86
3期1型沙丘	112.74	233.69	177.99	18.72	40.34	27.86	138.05	334.58	208.33
3期2型沙丘	91.64	281.26	193.02	9.06	37.74	24.07	66.62	321.69	180.09
3期3型沙丘	120.47	330.25	220.29	8.67	39.22	23.06	49.06	282.46	158.45
	南翼 L_S/m			北翼 L_N/m			底面积 S/km^2		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
1期1型沙丘	33.92	129.88	83.42	33.21	117.47	79.46	0.03	0.09	0.06
1期2型沙丘	22.65	504.75	89.36	20.30	728.25	110.29	0.01	0.14	0.07
1期3型沙丘	41.74	840.73	356.20	28.73	902.92	376.63	0.03	0.11	0.08
2期1型沙丘	42.71	171.29	85.74	41.99	133.96	78.81	0.03	0.08	0.05
2期2型沙丘	16.71	560.49	132.89	9.69	715.70	123.86	0.01	0.14	0.06
2期3型沙丘	33.22	827.25	376.48	25.41	899.38	396.29	0.03	0.11	0.08
3期1型沙丘	42.81	172.53	100.54	37.89	113.17	70.30	0.03	0.08	0.06
3期2型沙丘	22.75	576.79	140.49	15.73	751.95	130.28	0.01	0.14	0.06
3期3型沙丘	35.67	845.07	369.31	36.38	901.68	402.97	0.03	0.13	0.08

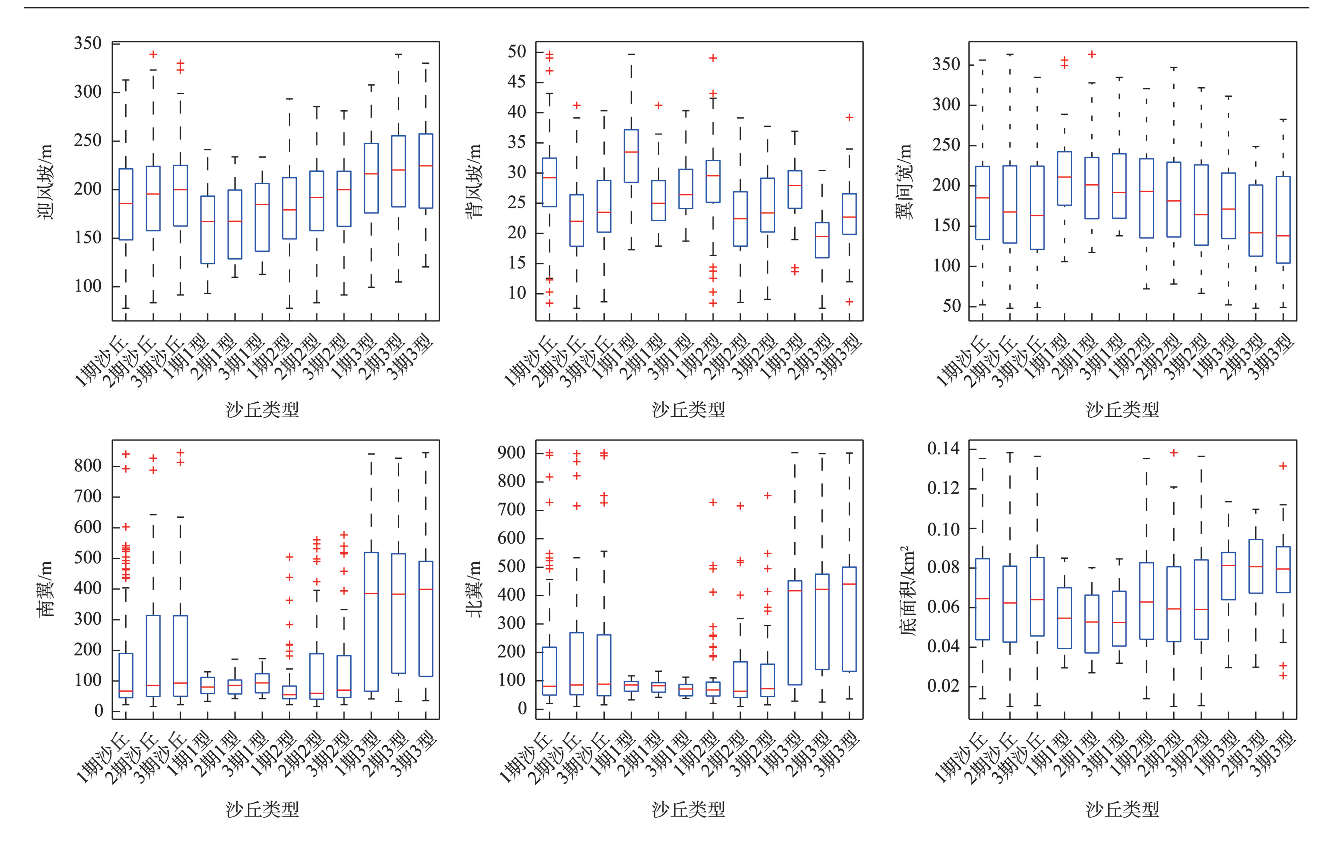
注：典型新月形沙丘简称1型沙丘；雏形新月形沙丘简称2型沙丘；雏形抛物线沙丘简称3型沙丘。

进一步对各参数的相关性分析发现，1~3期同时期内，在不区分沙丘类型的情况下，各期沙丘形态参数间的相关性变化不大(图5a)；在区分沙丘类型的情况下，1、2型沙丘的底面积与迎风坡长及翼间宽的相关性均较强，3型沙丘的底面积与迎风坡长相关性较强，但与翼间宽的相关性较弱，此外，3型沙丘南、北翼长间的相关性也较强(图5b~图5d)。另外，无论是区分沙丘类型还是不区分沙丘类型，2~3期沙丘参数相关性较接近，且普遍高于1期(图5)。底面积可以近似的反映沙丘的规模，在其与南、北翼有关的双变量图中，雏形抛物线沙丘的分布模式与其他2类沙丘的分布模式显著不同，而与南、北翼无关的双变量图中3类沙丘的分布模式差异不显著，且表现为一定的线性关系(图6)，类似的现象在图4、图5中均能发现。前一现象的产生可能与雏形抛物线沙丘南、北翼显著大于典型新月形沙丘和雏形新月形沙丘有关；而后一现象的产生暗示在新月形沙丘向抛物线沙丘转变的过程中，沙丘迎风坡、背风坡和底面积具有继承性，因而表现出一定的相关性。

3.4 新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的移动特征

根据3期卫星影像可获得新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘在1~2期(2008年1月15日—2011年6月4日)和2~3期(2011年6月4日—2016年9月20日)2个时段(分别简称1时段和2时段)的平均移动方向(表2)和平均移动速度(表3)。结果表明：1时段各类型沙丘不同部位的平均移动方向相对一致，平均整体移向为94°，方位近似于E；2时段各类型沙丘不同部位的平均移动方向也近似一致，但与1时段相比，各部位的移动方向表现为向南偏移，平均整体移向为99°，方位介于E与ESE之间，其中，以沙丘顶点的偏移最显著。此外，利用极坐标图(图7)对沙丘各部位移动方向的分析发现，迎风坡前端的移动方向相对其他部位更集中。

与沙丘移动方向不同的是，沙丘不同部位的移动速度在同时段内差异较显著(图7)，其中，沙丘顶点的移动速度在2个时段内均最大(表3)。1时段



注：统计值包括最大值（上边缘）、最小值（下边缘）、中位数（箱体内部的线段）、上四分位数（箱体上部的边，即占比75%的位置）、下四分位数（箱体下部的边，即占比25%的位置）和异常值（超出上、下边缘的值）。

图3　箱形图（按照沙丘类型）指示的1~3期沙丘形态参数统计值

Fig. 3　Box plot for statistical values of sand dune morphology parameters during 1−3 periods (according to dune types)

各类型沙丘的移动速度差异不大，平均移动速度为3.51 m·s^{-1}，2时段典型新月形沙丘和雏形新月形沙丘的移动速度明显大于雏形抛物线沙丘，三者的平均值为3.37 m·s^{-1}，雏形抛物线沙丘的整体移动速度仅为2.60 m·s^{-1}（表3）。对不同类型沙丘1、2时段的移动速度比较发现，典型新月形沙丘和雏形新月形沙丘的移动速度均小幅增加，而雏形抛物线沙丘的移动速度明显减小。

4　讨 论

4.1　干湖盆对新月形沙丘和抛物线沙丘共存区分布格局的影响

新月形沙丘和抛物线沙丘共存区与干湖盆分布区高度重合，其原因可能与区域含盐量的差异及其引起的植被分异有关。干湖盆分布区盐碱化程度高，限制了植被的生长，因此，不能发育与植被密切相关的抛物线沙丘[31]，而发育为典型新月形沙丘，这与新月形沙丘只出现在低植被覆盖区的特点一致[32]；干湖盆周围盐碱化程度逐渐降低，植被长势趋好，雏形新月形沙丘和雏形抛物线沙丘则开始发育。因此，从卫星图上能明显的发现，在沿着盛行风向穿过新月形沙丘和抛物线沙丘共存区的过程中，沙丘的翼角从指向上风向（抛物线沙丘）变为指向下风向（典型新月形沙丘和雏形新月形沙丘），经过干湖盆核心区域后又变为指向下风向（雏形抛物线沙丘和抛物线沙丘）。类似地，地下水的盐碱化也能改变沙丘形态分布格局。例如，美国白色沙漠沙丘的分布格局最初被解释为由风沙传输率的变化所致[33-34]，然而后来的研究发现，区域地下水含盐量的不同才是导致出现不同类型沙丘的真正原因[2]。

相对于固定、半固定的抛物线沙丘，可移动的新月形沙丘对生态脆弱区造成的破坏更为显著[6]，因此，这种由干旱、半干旱地区湖泊干涸引起的盐碱化及其引发的沙丘活化应该引起人们的重视。研究发现[35]，浑善达克沙地在全新世甚至更新世就分布着古大湖，那时候的气候远比现在湿润。然

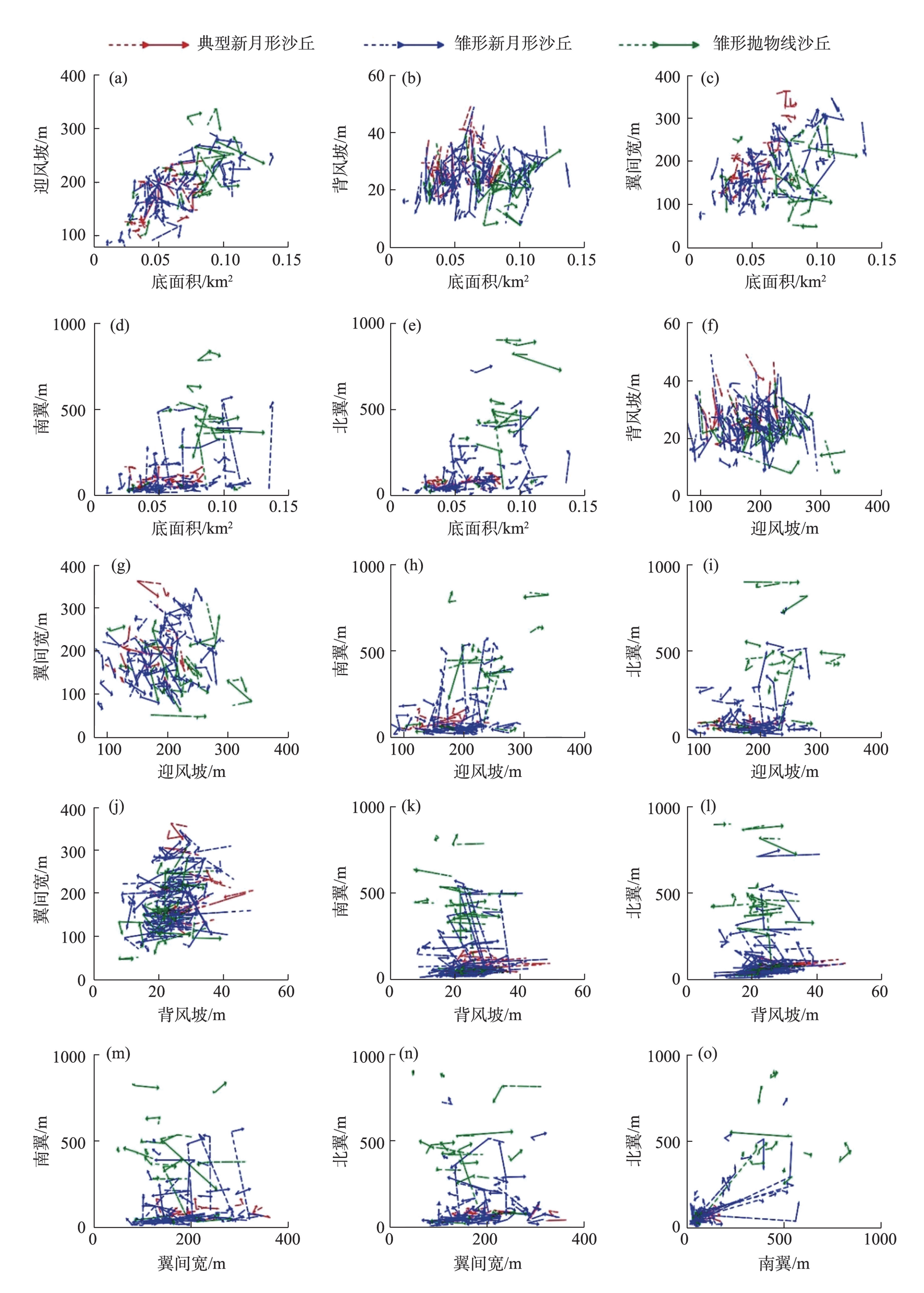


图4 新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘形态参数双变量(1~3期)

Fig. 4 Bivariate diagram of morphological parameters of dunes in coexistence zone of barchan dunes and parabolic dunes (1-3 periods)

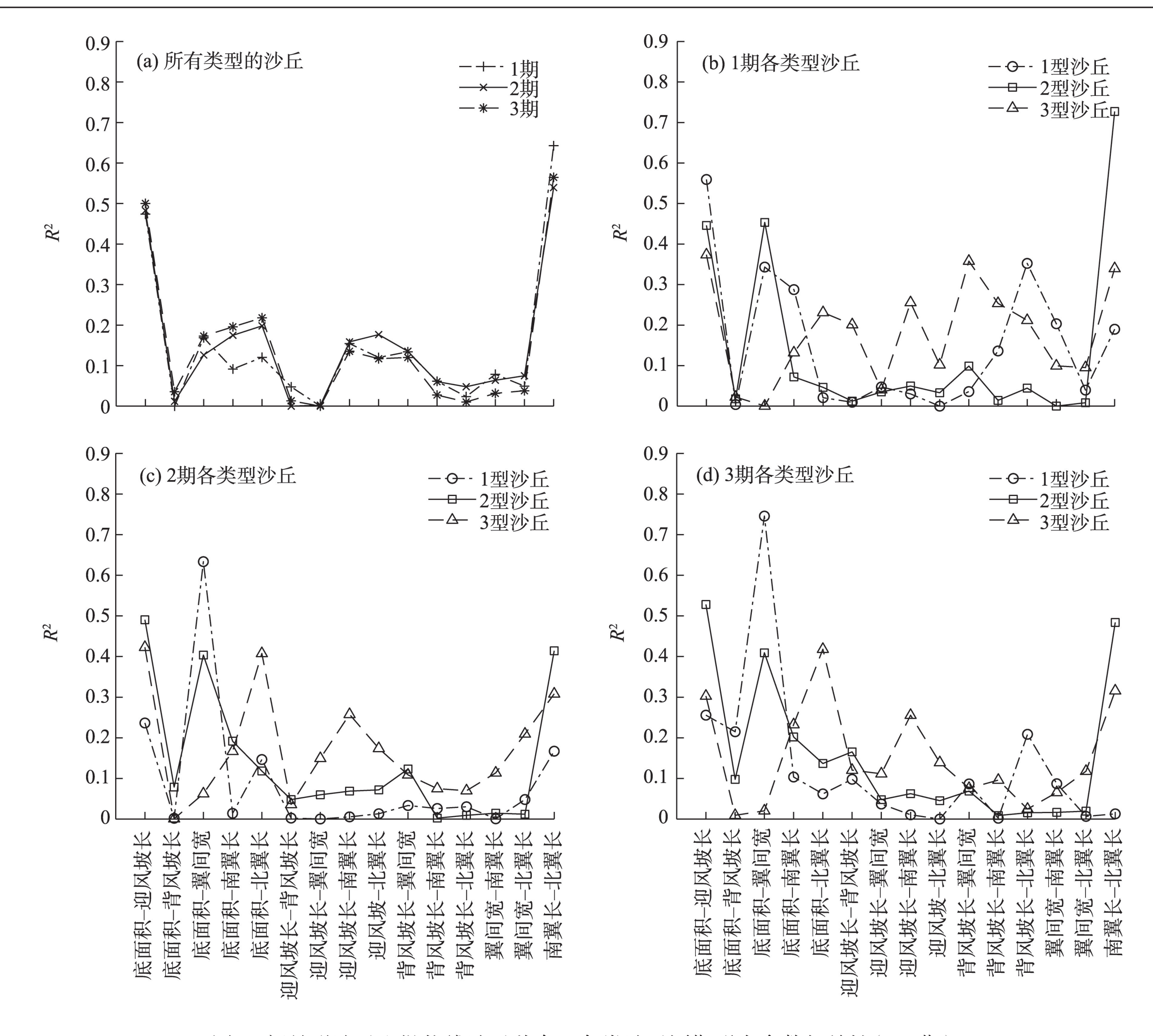


图5　新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘同期形态参数相关性(1~3期)

Fig. 5　Correlation ship of morphological parameters of dunes in coexistence zone of barchan dunes and parabolic dunes during the same period (1−3 periods)

而,近年来,随着气候变化和人类活动的影响,浑善达克沙地湖泊群面积快速萎缩,特别是生态更加脆弱和敏感的西部地区湖泊萎缩的更加明显[36]。对5区卫星影像的分析发现,2008年时其干湖盆周围还残留少量水域,而到2016年时该水域已经变成了白色的盐壳(图1c)。除了浑善达克沙地腹地,位于沙地北缘的呼日查干淖尔湖面积也在快速减小,并伴随着明显的盐碱化现象[36],其周边有着丰富的沙源,具备发育新月形沙丘的条件,且局部地区已经出现了新月形沙丘,如呼日查干淖尔湖西南边缘(即8区)出现的新月形沙丘(图1b)。

4.2　植被对新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的影响

浑善达克沙地沙丘类型与植被覆盖程度密切相关。宏观上,新月形沙丘和抛物线沙丘共存区所在的西部地区植被覆盖较低,一般小于10%[37],主要由流动和半固定的新月形沙丘和抛物线沙丘为主;而中、东部地区植被覆盖相对较高,为10%~30%[37],沙丘类型则以固定、半固定的抛物线沙丘、蜂窝状沙丘、沙垄、梁窝状沙丘、草灌丛沙堆和固定沙地为主[30-31]。微观上,植被是形成抛物线沙丘的关键因素。气候或人类土地利用方式的变化均会改善沙丘表面的植被条件[10, 13],首先在新月形沙丘风蚀和堆积作用相对较弱的翼角处生长[12];当植被逐渐繁殖起来后,除了其本身对风沙的屏障作用外,其根系也对风沙具有固定作用[38],在两者的双重作用下,沙丘两翼的移动速度开始慢于沙丘核心区域的移动速度,最终导致沙丘核心区域位于两翼之前,

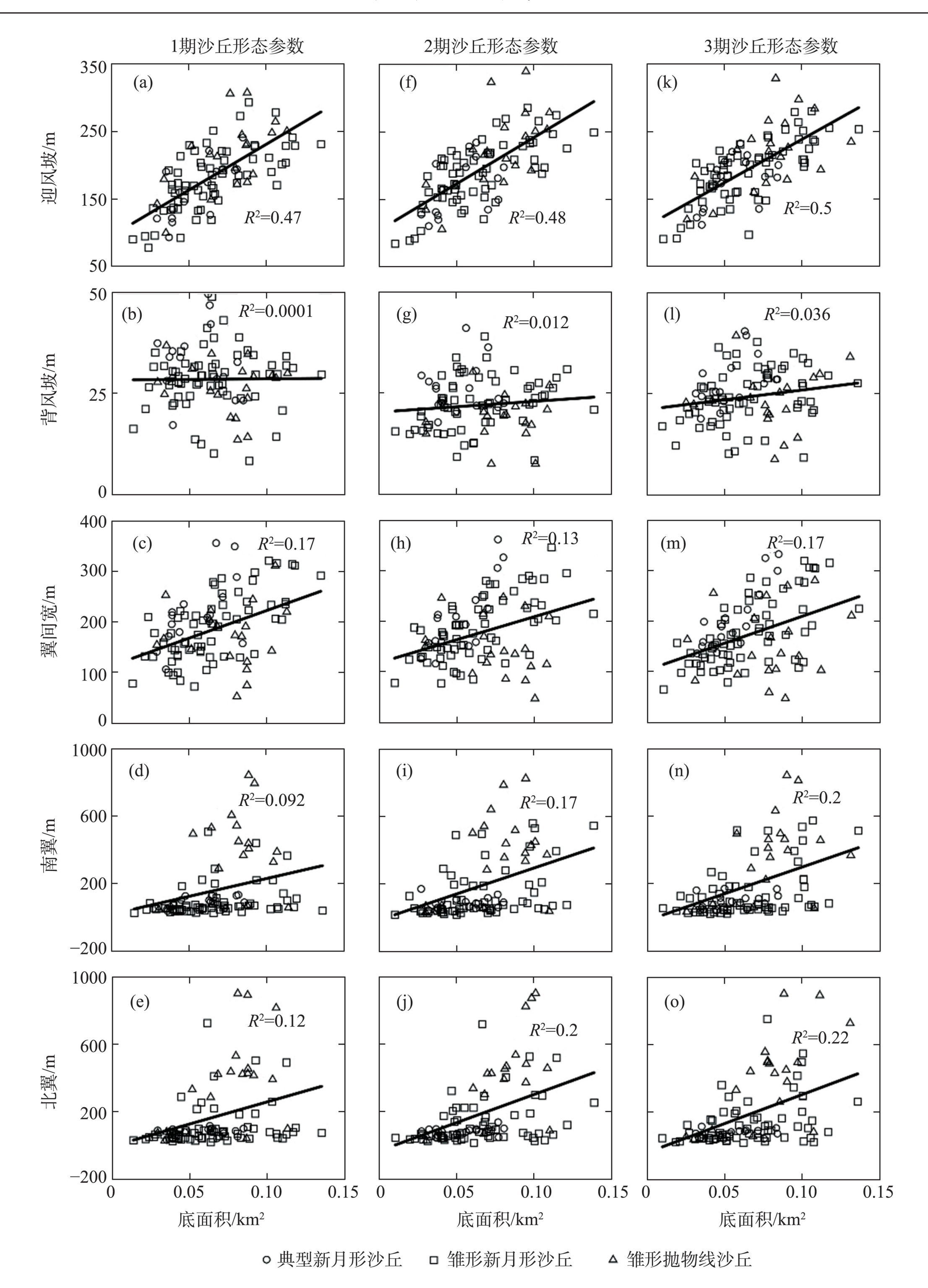


图6 新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘底面积与其他主要形态参数相关性分析(1~3期)

Fig. 6 Correlation analysis between bottom area and other main morphological parameters of dunes in coexistence zone of barchan dunes and parabolic dunes during 1-3 periods

翼角方向发生逆转并指向上风向,形成翼角指向与原新月形沙丘相反的抛物线沙丘。

植被状况对沙丘移动也具有重要的影响。根据笔者团队之前的研究[39],浑善达克沙地1时段的NDVI均值为0.2194,2时段的NDVI均值为0.2383,表明2时段浑善达克沙地区域植被覆盖增加。植被状况好转的大环境对不同类型沙丘移动速度的影响并不相同。由于典型新月形沙丘和雏形新月形

表2　新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的平均移动方向(以正北为0°,顺时针方向旋转)

Tab. 2　Average migration direction of dunes in coexistence zone of barchan dunes and parabolic dunes (north refer to 0 ° and clockwise)

沙丘类型	平均移动 方向/(°)											
	1时段(1~2期)						2时段(2~3期)					
	迎风坡前端	沙丘顶点	背风坡底	南翼	北翼	整体移向	迎风坡前端	沙丘顶点	背风坡底	南翼	北翼	整体移向
典型新月形沙丘	96	91	95	94	89	93	97	107	101	98	93	99
雏形新月形沙丘	94	92	93	95	93	94	95	107	99	97	103	100
雏形抛物线沙丘	93	97	95	100	90	95	98	103	97	95	99	98
平均值	94	93	94	97	91	94	97	105	99	96	98	99

表3　新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的平均移动速度

Tab. 3　Average migration velocity of dunes in coexistence zone of barchan dunes and parabolic dunes

沙丘类型	平均移动速度/($m\cdot a^{-1}$)											
	1时段(1~2期)						2时段(2~3期)					
	迎风坡前端	沙丘顶点	背风坡底	南翼	北翼	整体移速	迎风坡前端	沙丘顶点	背风坡底	南翼	北翼	整体移速
典型新月形沙丘	3.52	4.73	2.92	3.63	2.63	3.49	3.33	3.98	3.77	4.01	3.60	3.74
雏形新月形沙丘	2.88	5.57	3.08	3.00	2.53	3.41	3.28	3.98	3.93	3.73	3.92	3.77
雏形抛物线沙丘	2.95	5.72	3.27	3.55	2.62	3.62	2.80	2.99	2.93	2.01	2.30	2.60
平均值	3.12	5.34	3.09	3.40	2.60	3.51	3.14	3.65	3.54	3.25	3.27	3.37

沙丘本身植被覆盖低,受植被变化的影响小,因此,其整体移动速度并没有明显的减小(图7i和图7l);而雏形抛物线沙丘受植被影响显著,其整体移动速度与2时段浑善达克沙地整体植被好转的大背景一致,表现为移动速度减小(图7i和图7l)。

4.3　风况对新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的影响

风况是影响沙丘形态和移动速度的另一关键因素。Fryberger等[40]以大于12节(约6 $m\cdot s^{-1}$)的风速作为起沙风,提出了输沙势(Drift Potential,DP)、合成输沙势(Resultant Drift Potential,RDP)、合成输沙势方向(Resultant Drift direction,RDD)和RDP/DP 4个指标,用来讨论风能环境及其与沙丘形成的关系,并得到广泛应用[41-43]。

本文选择研究区上风向二连浩特气象站3 h风向和风速数据计算DP、RDP、RDD和RDP/DP(表4)。结果发现,从2008—2011年(1时段)到2011—2016年(2时段),RDD、RDP和DP均增大,RDP/DP减小。RDD的增大表明,合成输沙势的方向向南偏移,该结果与各类型沙丘的实际移动方向一致(图7)。DP可有效反映风能环境[43],DP显著增加表明,风能环境由低风能环境转变为中等风能环境,此外,RDP的增加应该促进沙丘的移动,然而实际情况是两者对不同种类沙丘移动速度的影响并不相同。典型新月形沙丘和雏形新月形沙丘由于植被覆盖少,随着DP和RDP的增大其整体移动速度也相应增大,表现出一致的变化趋势;而雏形抛物线沙丘的整体移动速度并没有因为DP和RDP的增加而增加,反而因为植被覆盖度的增加而减小(图7i和图7l),表明风能环境对雏形抛物线沙丘移动的影响不如植被显著。此外,RDP/DP指示风向变率,新月形沙丘一般出现在RDP/DP均值超过0.68的环境中[40],二连浩特气象站的RDP/DP较高,满足典型新月形沙丘的发育环境,属于新月形沙丘潜在发育区。

4.4　其他因素对新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的影响

除了上述影响因素外,地形、沙源和人类活动对新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘也有重要影响,特别是对局部地区的个体沙丘影响更加显著。其中,地形能显著改变沙丘的形态,例如,通过物探方法对巴丹吉林沙漠高大沙山的研究发现,下覆地形在高大沙山的形成过程中起到关键性作用[44]。对于浑善达克沙地而言,由于其新月形沙丘均分布于干湖盆,因此,地形从中心向四周逐渐升高,特别是当沙丘位于地形剧烈变化区时,往往导

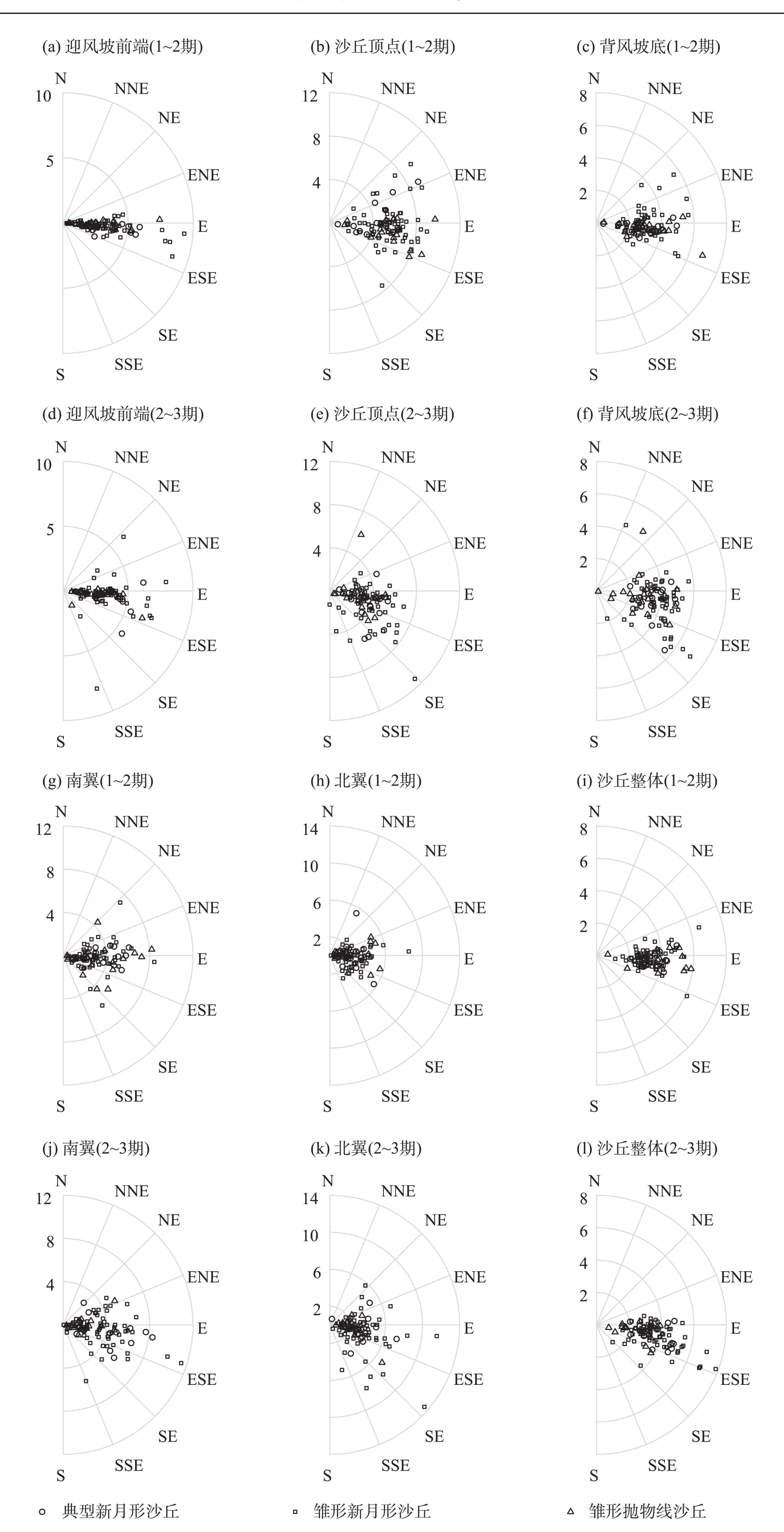


图7 极坐标图指示的新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的移动方向和移动速度(速度单位为m·a^{-1})

Fig. 7 The migration direction and velocity of dunes in coexistence zone of barchan dunes and parabolic dunes indicated by the polar diagram (velocity unit: m·a^{-1})

表4　二连浩特气象站1、2时段的输沙势

Tab. 4　the sand drift potential during span 1 and span 2

二连浩特气象站	DP	RDP	RDD	RDP/DP
2008—2011年	61	51	271.52	0.83
2011—2016年	394	280	274.67	0.71

致沙丘形态发生变化。例如，数值模拟证实沙丘爬坡过程中因地形的影响会导致沙丘两翼不对称[45]。另外，典型新月形沙丘一般形成于沙源较少的区域，研究区虽然没有位于沙源较少的沙漠边缘区，但由于其周边特别是上风向多以固定、半固定的抛物线沙丘为主，这种低沙源供给的环境也为新月形沙丘的出现提供了理想的环境。此外，人为因素对新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的影响具有两面性，一方面过牧等人为活动可能导致植被退化、抛物线沙丘活化；另一方面，合理的防沙治沙工程也可以使新月形沙丘逐步固定，这种半固定的新月形沙丘在浑善达克沙地较为常见。

5　结 论

浑善达克沙地西部新月形沙丘和抛物线沙丘共存区的沙丘类型包括典型新月形沙丘、雏形新月形沙丘和雏形抛物线沙丘。本文基于Esri历史影像服务对不同时期的沙丘形态参数进行提取，并计算了沙丘的移动方向和移动速度。得出以下结论：

（1）新月形沙丘和抛物线沙丘共存区集中分布于浑善达克沙地西部的15个区域，且各区域内均分布干湖盆。干湖盆的出现引起局部区域盐碱化，限制了植被生长及与其相关的抛物线沙丘的发育，并最终导致新月形沙丘的出现，这是决定浑善达克沙地新月形沙丘和抛物线沙丘共存区分布格局的关键因素。因此，在沙漠化防治过程中，对因湖泊干涸和盐碱化导致的沙丘活化现象应引起足够重视。

（2）对新月形沙丘和抛物线沙丘共存现象最典型的5区3期（2008年1月15日、2011年6月4日和2016年9月20日）历史影像分析发现，各类沙丘的迎风坡、翼间宽、底面积和背风坡均具有明显的变化趋势，其中位数分别表现为增加、减小、小幅减小、先减少后增加；但南、北翼的变化较复杂，中位数异常值最多。沙丘形态参数相关性分析进一步表明，南、北两翼变化最大，迎风坡长、背风坡长和底面积的变化具有继承性。

（3）对同期影像分析发现，不同类型沙丘形态参数的中位数差异明显，就迎风坡和底面积而言，典型新月形沙丘<雏形新月形沙丘<雏形抛物线沙丘；就背风坡和翼间宽而言，典型新月形沙丘>雏形新月形沙丘>雏形抛物线沙丘；此外，雏形抛物线沙丘的南、北翼明显大于典型新月形沙丘和雏形新月形沙丘。

（4）3类沙丘的移动方向差异不明显并与RDD的变化趋势一致，而三者的移动速度差异显著，主要受到植被和风速的影响，且不同类型沙丘受到的影响并不相同。其中，植被覆盖度对植被覆盖条件较好的雏形抛物线沙丘的移动速度影响最显著，而风速对相对裸露的典型新月形沙丘和雏形新月形沙丘移动速度的影响更显著。此外，地形、沙源和人类活动对新月形沙丘和抛物线沙丘共存区各类沙丘的形态和移动均有影响。

参考文献（References）：

[1] Zhang D, Liang P, Yang X, et al. The control of wind strength on the barchan to parabolic dune transition[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(10): 2300-2313.

[2] Langford R P, Rose J M, White D E. Groundwater salinity as a control on development of eolian landscape: An example from the White Sands of New Mexico[J]. Geomorphology, 2009, 105(1-2): 39-49.

[3] Yan N, Baas A C W. Parabolic dunes and their transformations under environmental and climatic changes: Towards a conceptual framework for understanding and prediction[J]. Global and Planetary Change, 2015, 124: 123-148.

[4] Yan N, Baas A C W. Environmental controls, morphodynamic processes, and ecogeomorphic interactions of barchan to parabolic dune transformations[J]. Geomorphology, 2017, 278: 209-237.

[5] Livingstone I, Warren A. Aeolian Geomorphology: A New Introduction[M]. Hoboken, USA: Wiley Blackwell, 2019.

[6] Dong Z, Chen G, He X, et al. Controlling blown sand along the highway crossing the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(3): 329-344.

[7] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. [Wu Zheng. Chinese Desert and Its Management[M]. Beijing: Science Press, 2009.]

[8] 李继彦. 柴达木盆地线形沙丘发育环境与演化模式[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2020. [Li Jiyan. Development Environment and Evolution Patterns of Linear Dunes in the Qaidam Basin[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2020.]

[9] Girardi J D, Davis D M. Parabolic dune reactivation and migration

at Napeague, NY, USA: Insights from aerial and GPR imagery[J]. Geomorphology, 2010, 114(4): 530-541.

[10] Tsoar H, Blumberg D G. Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(11): 1147-1161.

[11] Hanoch G, Yizhaq H, Ashkenazy Y. Modeling the bistability of barchan and parabolic dunes[J]. Aeolian Research, 2018, 35: 9-18.

[12] Reitz M D, Jerolmack D J, Ewing R C, et al. Barchan-parabolic dune pattern transition from vegetation stability threshold[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(19): L19402.

[13] Wolfe S A, Hugenholtz C H. Barchan dunes stabilized under recent climate warming on the northern Great Plains[J]. Geology, 2009, 37(11): 1039-1042.

[14] Goudie A. Parabolic dunes: Distribution, form, morphology and change[J]. Annals of Arid Zone, 2011, 50(3&4): 1-7.

[15] Kumar M, Goossens E, Goossens R. Assessment of sand dune change detection in Rajasthan (Thar) Desert, India[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(9): 1689-1703.

[16] Moosavi V, Moradi H, Shamsi S R F, et al. Assessment of the planimetric morphology of barchan dunes[J]. Catena, 2014, 120: 12-19.

[17] 石唯康, 董治宝, 陈国祥, 等. 新月形沙丘与线形沙丘共生现象探讨——以撒哈拉沙漠为例[J]. 中国沙漠, 2020, 40(3): 135-144. [Shi Weikang, Dong Zhibao, Chen Guoxiang, et al. Discussion on the symbiosis of barchan dune and linear dune: A case study from Sahara Desert[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(3): 135-144.]

[18] 王静璞, 刘连友, 沈玲玲. 基于Google Earth的毛乌素沙地新月形沙丘移动规律研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 1094-1100. [Wang Jingpu, Liu Lianyou, Shen Lingling. Research of the barchan dunes movement in the MU US Sandy Land on Google Earth software[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(6): 1094-1100.]

[19] 杨军怀, 董治宝, 刘铮瑶, 等. 库鲁克沙漠风沙地貌与沙丘移动[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 1-8. [Yang Junhuai, Dong Zhibao, Liu Zhengyao, et al. Aeolian geomorphology and dune migration in the Quruq Desert, China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 1-8.]

[20] 杨馥宁, 吕萍, 马芳, 等. 腾格里沙漠南部格状沙丘的形态演变及移动特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(1): 1-9. [Yang Funing, Lü Ping, Ma Fang, et al. Morphological evolution and migration characteristics of reticulate dunes at southern fringe of Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(1): 1-9.]

[21] Dakir D, Rhinane H, Saddiqi O, et al. Automatic extraction of dunes from Google Earth images new approach to study the dunes migration in the Laâyoune city of Morocco[C]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2016, 42: 53-59.

[22] Vermeesch P, Drake N. Remotely sensed dune celerity and sand flux measurements of the world´s fastest barchans (Bodélé, Chad)[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(24): L24404.

[23] Levin N, Ben-Dor E, Karnieli A. Topographic information of sand dunes as extracted from shading effects using Landsat images[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(2): 190-209.

[24] 任孝宗, 李建刚, 刘敏, 等. 浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 791-800. [Ren Xiaozong, Li Jiangang, Liu Min, et al. Hydrochemical composition of natural waters and its affecting factors in the east Hunshandak Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2019,36(4):791-800.]

[25] Yang X, Wang X, Liu Z, et al. Initiation and variation of the dune fields in semi-arid China——with a special reference to the Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 78: 369-380.

[26] 刘树林, 王涛, 郭坚. 浑善达克沙地春季风沙活动特征观测研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 356-361. [Liu Shulin, Wang Tao, Guo Jian. Characteristics of blown sand activities in Hunshandake Sandy Land in spring[J]. Journal of Desert Research, 2006,26(3): 356-361.]

[27] Yang X, Liang P, Zhang D, et al. Holocene aeolian stratigraphic sequences in the eastern portion of the desert belt (sand seas and sandy lands) in northern China and their palaeoenvironmental implications[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(8): 1302-1315.

[28] 任孝宗. 水化学图形表达方法、MATLAB实现及在天然水体中的应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2021. [Ren Xiaozong. Graphic expression, MATLAB Implementation and Its Application for Hydrochemistry in Natural Water Bodies[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2021.]

[29] 杨军怀. 塔克拉玛干沙漠沙丘移动研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019. [Yang Huaijun. A Study on the Movement of Sand Dunes in the Taklamakan Desert[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.]

[30] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003. [Wang Tao. Desert and Desertification in China[M]. Shijiazhuang: Hebei Science & Technology Press, 2003.]

[31] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论[M]. 北京: 科学出版社, 1980. [Zhu Zhenda, Wu Zheng, Liu Shu, et al. An Outline of Chinese Deserts[M]. Beijing: Science Press, 1980.]

[32] Wilson I G. Ergs[J]. Sedimentary Geology, 1973, 10(2): 77-106.

[33] Mckee E D. Structures of dunes at white sands national monument, New Mexico (and a comparison with structures of dunes from other selected areas)[J]. Sedimentology, 1966, 7(1): 3-69.

[34] Mckee E D, Moiola R J. Geometry and growth of the white sands dune field, New Mexico[J]. Journal of Research of the US Geological Survey, 1975, 3(1): 59-66.

[35] Yang X, Scuderi L, Paillou P, et al. Quaternary environmental

changes in the drylands of China——A critical review[J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(23-24): 3219-3233.

[36] 白雪梅, 春喜, 斯琴毕力格, 等. 近45 a内蒙古浑善达克沙地湖泊群的变化[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1086-1094. [Bai Xuemei, Chun Xi, Siqin Bilige, et al. Changes of lakes in Hunshandake Sandy Land in the past 45 years, Inner Mongolia[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(5): 1086-1094.]

[37] Ma W, Wang X, Zhou N, et al. Relative importance of climate factors and human activities in impacting vegetation dynamics during 2000-2015 in the Otindag Sandy Land, northern China[J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(4): 558-567.

[38] Lancaster N, Baas A. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: Field studies at Owens Lake, California[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(1): 69-82.

[39] 马永桃, 任孝宗, 胡慧芳, 等. 基于地理探测器的浑善达克沙地植被变化定量归因[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 195-204. [Ma Yongtao, Ren Xiaozong, Hu Huifang, et al. Vegetation dynamics and its driving force in Otindag Sandy Land based on Geodetector [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 195-204.]

[40] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime[C]//Edwin M. A Study of Global Sand Seas. Washington: United states government printing office, 1979.

[41] Cui X, Sun H, Dong Z, et al. Temporal variation of the wind environment and its possible causes in the Mu Us Dunefield of Northern China, 1960—2014[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 135(3): 1017-1029.

[42] Wang X, Zhou Z, Dong Z. Control of dust emissions by geomorphic conditions, wind environments and land use in northern China: An examination based on dust storm frequency from 1960 to 2003[J]. Geomorphology, 2006, 81(3-4): 292-308.

[43] Yang X, Forman S, Hu F, et al. Initial insights into the age and origin of the Kubuqi sand sea of northern China[J]. Geomorphology, 2016, 259: 30-39.

[44] Yang X, Scuderi L, Liu T, et al. Formation of the highest sand dunes on Earth[J]. Geomorphology, 2011, 135(1-2): 108-116.

[45] Parteli E J R, Durán O, Bourke M C, et al. Origins of barchan dune asymmetry: Insights from numerical simulations[J]. Aeolian Research, 2014, 12: 121-133.

Geomorphologic characteristics of the co-existence zone of barchan and parabolic dunes in western Hunshandake Sandy Land

REN Xiaozong, WANG Songsong, WANG Yamei, LUO Jinhong, MA Yongtao
(Taiyuan Normal University, School of Geographical Sciences, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: Barchan and parabolic dunes can be transformed into each other and coexist in the same area, resulting in a unique landscape in which typical barchan dunes coexist with embryonic barchan and parabolic dunes. It is helpful to understand the causes of their formation and execute targeted desertification prevention and control projects after studying their spatial distribution, morphological characteristics, and migration. Based on the Esri historical image service (World Imagery Wayback), the morphological parameters of the dunes in the coexistence zone of the barchan and parabolic dunes, west of Hunshandake Sandy Land, were extracted in three periods: January 15, 2008, June 4, 2011, and September 20, 2016, and the direction and velocity of the dune migration were calculated. The results indicate that typical barchan dunes are concentrated in 15 areas related to the dry lake bed in the western part of the sandy land, whereas embryonic barchan and parabolic dunes are sequentially distributed around the periphery of the dry lake bed. The appearance of the dry lake bed was a key factor in the development of the typical barchan dunes in the Hunshandake Sandy Land. Therefore, more attention should be paid to the desertification caused by the lake drying up. The analysis of morphological parameters of sand dunes in the fifth zone, where the co-existence of barchan and parabolic dunes is typically found, indicates that the typical barchan and embryonic barchan dunes significantly differ from embryonic parabolic dunes. The correlation analysis between the morphological parameters of sand dunes indicates that toss slope length, lee slope length, and bottom area are inherited from the barchan to parabolic dunes, with horns experiencing the greatest changes during this process. Furthermore, the migration directions of the three types of dunes are almost equal but have varying migration velocities, as well as the factors that affect the migration of sand dunes. The most significant impact on the embryonic parabolic dunes, whose vegetation cover is relatively high, was the vegetation cover, whose variation was consistent with that of NDVI during the same period. The most significant impact on the typical barchan and embryonic barchan dunes, whose vegetation cover is relatively low, was wind speed, whose variation was consistent with that of DP and RDP during the same period. Additionally, other factors, including terrain, sand sources, and human activities, can influence the morphology and migration of barchan-parabolic dunes.

Keywords: barchan dunes; parabolic dunes; coexistence; morphology and migration; Hunshandake Sandy Land